

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів першого (бакалаврського рівня) вищої освіти
за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка».

Київ 2024

ББК 32.973-01
К45

Укладачі: В.Ю. Луценко, канд. техн. наук, доцент;
М.В. Волчков, асистент

Рецензент Г.М. Голенков, кандидат техн. наук., доцент кафедри
електротехніки та електроприводу КНУБА

Відповідальний за випуск А.В. Запривода, канд. техн. наук, доцент, завідувач
кафедри АТП

*Затверджено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів,
протокол № 4 від 24 жовтня 2024 року.*

В авторській редакції.

Електроніка та мікросхемотехніка: методичні вказівки до практичних занять /
уклад.: Луценко В.Ю., Волчков М.В. – Київ: КНУБА, 2024. – 31 с.

Містять зміст, теоретичні відомості про будову, принцип дії, параметри та
основні характеристики параметричних стабілізаторів та транзисторних
стабілізаторів з безперервним регулюванням.

Призначено для студентів спеціальності для студентів спеціальностей
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

© КНУБА, 2024

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
Практичне заняття 1. Параметричні стабілізатори постійної напруги.....	5
Практичне заняття 2. Розрахунок однокаскадного стабілізатора	10
Практичне заняття 3. Розрахунок двокаскадного стабілізатора	13
Практичне заняття 4. Транзисторні стабілізатори постійної напруги з безперервним регулюванням.	15
Список літератури	30

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Дисципліна «Електроніка та мікросхемотехніка» відноситься до дисциплін фундаментальної підготовки. Метою практичних занять з цієї дисципліни є формування у студентів практичних навичок з розрахунку електричних кіл електронних засобів автоматизації технологічних процесів.

Матеріали практичних занять підготовлені відповідно до робочої програми освітньої компоненти «Електроніка та мікросхемотехніка» та призначені для використання студентами, які навчаються за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і вивчають основи електронної техніки, що відноситься до базової частини фахової підготовки.

У методичних вказівках особливу увагу приділено фізичним процесам у напівпровідниках та електронним приладам на їх основі. Вирішення багатьох розглянутих задач допомагає усвідомити фізичний зміст електричних явищ в напівпровідниках, що сприяє розвитку навичок практичного застосування отриманих теоретичних знань та розкриває зв'язок кількісних характеристик з якісними ознаками.

Розрахунок параметрів та характеристик електронних засобів та найпростіших схем промислової автоматизації виконується за формулами з урахуванням низки припущень, а також з урахуванням лише певних фізичних процесів, що відбуваються у реальних електронних приладах. З огляду на це практичні розрахунки повинні розвивати у студентів розуміння меж застосування відповідних формул, а також наповнювати фізичним змістом отримані результати.

Важливою частиною вивчення курсу «Електроніка та мікросхемотехніка» є самостійна робота, у ході якої студенти опрацьовують відповідний теоретичний матеріал лекцій чи підручників. Особлива увага при цьому приділяється аналізу прикладів вирішення поставлених задач.

Практичні заняття дозволяють закріпити теоретичні знання, поглиблено вивчити більш складні питання електроніки, отримати необхідні навички аналізу та практичного розрахунку елементів та вузлів засобів промислової автоматики.

Практичне заняття 1. Параметричні стабілізатори постійної напруги.

Для стабілізації напруги постійного струму використовуються нелінійні елементи, величина напруги на котрих мало залежить від струму, який проходить крізь них. Зазвичай в якості таких елементів використовують кремнієві стабілітрони.

Кремнієві стабілітрони - це площинні діоди, виготовлені за особливої технології. На відміну від звичайних діодів, кремнієві стабілітрони працюють на зворотній гілці вольт-амперної характеристики у зоні електричного пробою. На рис. 1.1 зображена вольт-амперна характеристика кремнієвого стабілітрону. Область 1-2 характеристики є робочою.

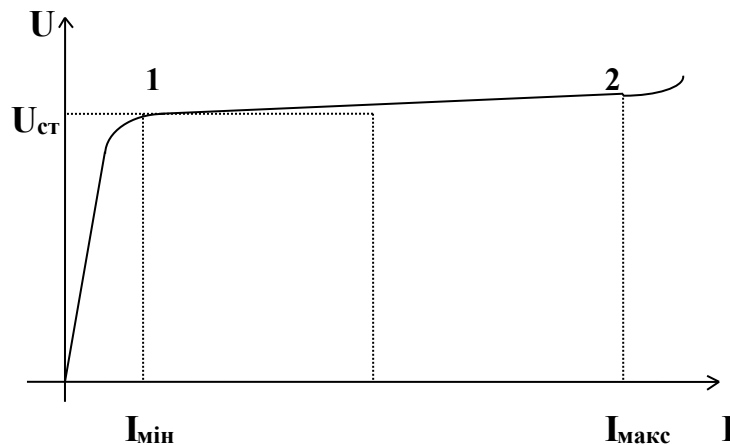


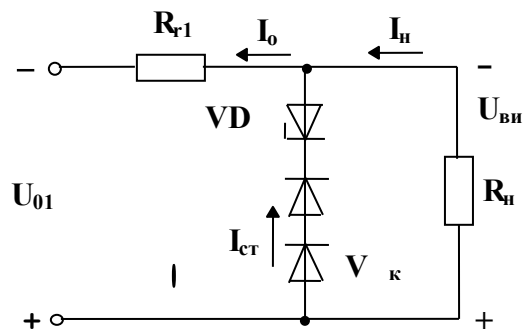
Рис. 1.1. Вольт-амперна характеристика кремнієвого стабілітрона.

Електронна промисловість виробляє кремнієві стабілітрони на напругу стабілізації від одиниць до кількох сотень вольт. Температурний коефіцієнт кремнієвих стабілітронів, тобто залежність напруги стабілізації від температури навколишнього середовища, складає від $-0,06$ до $+0,12\%$ ($1/^\circ\text{C}$). Навантажувальна здатність кремнієвих стабілітронів відносно велика. Їхня потужність може складати від 100 мВт до 50 Вт.

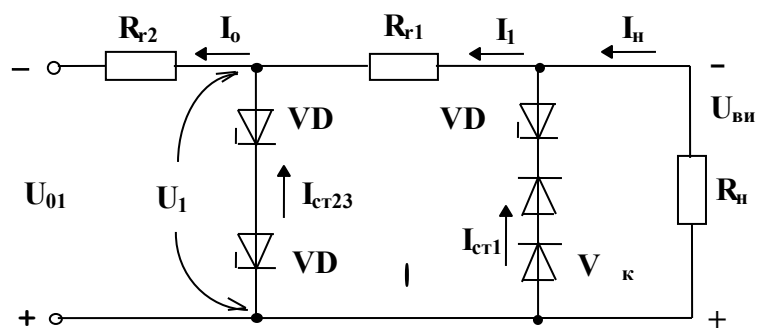
Найточніша стабілізація можлива у стабілітронів з напругою стабілізації між 6 та 7 В, завдяки тому, що вони мають найменший динамічний опір та найменший температурний коефіцієнт. Температурний коефіцієнт у кремнієвих стабілітронів з напругою менш ніж 6 В - негативний, а у стабілітронів з напругою більш 7 В - позитивний. Заради збільшення напруги, що стабілізується, стабілітрони можливо ввімкнути послідовно. Паралельне ввімкнення стабілітронів неприпустимо, тому що невелика

різниця у робочих напругах, яка завжди має місце, спричиняє нерівномірний розподіл струмів, що протікає через них.

На рис. 1.2.а наведена однокаскадна схема параметричного стабілізатору на кремнієвих стабілітронах. Схема стабілізатору складається з резистору R_{r1} , ввімкненого послідовно з споживачем, стабілітрону VD1 та компенсаційних діодів VD_k , ввімкнених паралельно споживачу.



а)



б)

Рис. 1.2. Схеми параметричних стабілізаторів:
а - однокаскадна; б - двокаскадна.

Принцип дії однокаскадного параметричного стабілізатору полягає у наступному. При збільшенні напруги на вході стабілізатора струм крізь стабілітрон VD1 різко зростає, що причинає збільшення падіння напруги на резисторі R_{r1} . Збільшення напруги на резисторі R_{r1} приблизно дорівнює збільшенню напруги на вході стабілізатора, тому напруга на виході стабілізатора при цьому змінюється дуже непомітно.

Коефіцієнт стабілізації однокаскадного параметричного стабілізатора дорівнює:

$$K_{cm} = \frac{U_{вих}}{U_{01}} \times \frac{R_{r1}}{r_{cm1}}, \quad (1.1)$$

де r_{cm1} - диференціальний опір стабілітрона VD1.

Як видно з (1.1), величина стабілізації залежить від величини опору резисторів R_{r1} та r_{cm1} . При збільшенні резистору R_{r1} необхідно піднімати величину напруги на вході U_{01} , і тому коефіцієнт стабілізації не може зростати безмежно.

Враховуючи зміни вхідної напруги вираз для коефіцієнту стабілізації можна надати у наступному вигляді:

$$K_{ct} = K_{ct.макс} \left(1 - \frac{U_{вих}}{U_{01}(1 - a_{мін} - a_{\sim})}\right), \quad (1.2)$$

де

$$K_{ct.макс} = \frac{U_{вих}(1 - a_{мін} - a_{\sim})}{(I_{н.макс} + I_{cm1.мін})r_{cm1}} \quad (1.3)$$

Відповідно до отриманих виразів є максимально можливий коефіцієнт стабілізації однокаскадного параметричного стабілізатора. В (1.2) та (1.3) $a_{мін}$ - відносне відхилення напруги мережі у бік зниження; a_{\sim} - відносна амплітуда змінної складової вхідної напруги; $I_{н.макс}$, $I_{ct.1мін}$ - максимальний струм навантаження та мінімальний струм через стабілітрон VD1.

З виразу (1.3) видно, що для стабілітрону VD1 при відомій величині струму навантаження коефіцієнт стабілізації не може бути більше ніж величина $K_{ct.макс}$. Внутрішній опір однокаскадного параметричного стабілізатора без урахування опору компенсуючих діодів дорівнює приблизно диференціальному опору стабілітрона r_{ct1} ($r_i = -r_{ct1}$).

Зміна навколишньої температури спричиняє зміни вихідної напруги стабілізатора. Зміна вихідної напруги у залежності від температури характеризується температурним коефіцієнтом стабілізатора γ .

У свою чергу величина γ залежить від температурного коефіцієнта напруги стабілітрона, який використовується в схемі. Заради зменшення температурного коефіцієнту γ у деяких випадках використовують температурну компенсацію, вмикаючи послідовно з стабілітроном термозалежні елементи або діоди. Температурний коефіцієнт напруги (ТКН) цих елементів повинен мати протилежний знак ТКН стабілітрона.

На схемі рис. 1.2.а в якості компенсуючого елемента використано звичайні діоди або стабілітрони VD_k , ввімкнені у прямому напрямку. Така температурна компенсація застосовується для стабілітронів, які мають позитивний ТКН. Температурний коефіцієнт напруги діода або стабілітрона, включеного у прямому напрямку, негативний. При зміні навколишньої температури (наприклад, збільшенні) напруга на стабілітроні збільшується, а

на діоді спадає, в наслідок чого сумарна напруга змінюється мало. Ввімкнення термокомпенсуючих елементів послідовно зі стабілітроном спричиняє збільшення внутрішнього опору стабілізатора та зменшення коефіцієнту стабілізації.

У випадку, коли необхідно отримати велику точність стабілізації, використовують багатокаскадні схеми параметричних стабілізаторів.

На рис. 1.2.б зображена схема двокаскадного параметричного стабілізатора на кремнієвих стабілітронах. Вихідний каскад стабілізатора, який складається з стабілітрону VD1, компенсуючих діодів VD_к, резистора R_{r1}, отримує живлення від попереднього стабілізатора, який виконано на стабілітронах VD2, VD3 та резисторі R_{r2}. Коефіцієнт стабілізації такої схеми дорівнює добутку коефіцієнтів стабілізації першого та другого каскадів.

Внутрішній опір схеми на рис. 1.2.б без урахування опору діодів VD_к так само, як і в однокаскадному параметричному стабілізаторі, дорівнює приблизно динамічному опору стабілітрона VD1. Таким чином, використовуючи багатокаскадні параметричні стабілізатори, є можливість значно підвищити коефіцієнт стабілізації, але стабільність вихідної напруги при зміні струму навантаження залишається такою самою, як і в однокаскадних схемах.

Заради отримання більших значень коефіцієнту стабілізації у схемах рис. 1.2 необхідно збільшувати опір резисторів на яких відбувається падіння надлишкової напруги, що обумовлює необхідність збільшення величини вхідної напруги U₀₁. Величина вхідної напруги U₀₁ може значно перевищувати напругу на виході стабілізатору. Підвищення вхідної напруги спричиняє зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) стабілізатора.

На рис. 1.3 зображена схема параметричного стабілізатора, в якій замість резистора, на якому розсіюється надлишкова напруга, увімкнено стабілізатор струму. Останній складається з транзистора VT1, резисторів R1, R2 та стабілітрона VD3.

Стабілізатор струму являє собою емітерний повторювач, на вхід котрого надходить напруга стабілітрона VD3. Напруга на стабілітроні VD3 змінюється незначно при зміні вхідної напруги. Напруга на резисторі R1 також змінюється незначною мірою, завдяки тому, що вона приблизно дорівнює напрузі на стабілітроні VD3. Внаслідок незмінності напруги на резисторі R1 струми емітера та колектора транзистора VT2 практично не змінюються при зміні вхідної напруги U₀₁. Незмінність колекторного струму транзистора VT2 спричиняє стійкість положення робочої точки на вольт-амперній характеристиці стабілітрона при зміні вхідної напруги U₀₁.

Стабілізатор струму має великий внутрішній опір, та його використання еквівалентно ввімкненню резистора R_{r1} з дуже великим опором.

Еквівалентний опір стабілізатора струму:

$$R_{r_{екв}} \approx \frac{h_{21e2} r_{к2} R_2 R_1}{R_2 R_1 + r_{cm3} r_{к2} h_{21e2}} \quad (1.4)$$

де h_{21e2} , $r_{к2}$ - статичний коефіцієнт передачі струму та опір колектору транзистора VT2 у схемі зі спільним емітером;

$r_{ст3}$ - диференціальний опір стабілітрона VD3.

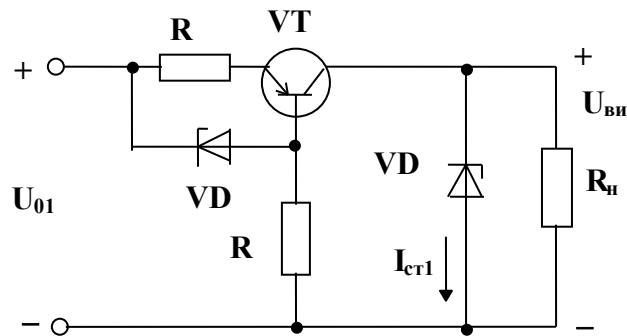


Рис. 1.3. Схема параметричного стабілізатора з стабілізатором струму.

З виразу (1.4) бачимо, що величина $R_{r_{екв}}$ не може бути більш ніж величина $h_{21e2} r_{к2}$. Ця рівність можлива у тому разі, якщо диференціальний опір стабілітрона VD3 дорівнює нулю. З виразу (1.1), замінивши R_{r1} на $R_{r_{екв}}$, можна визначити коефіцієнт стабілізації для цієї схеми. Внутрішній опір схеми на рис.1.3, так само як і для схем на рис.1.2, дорівнює диференціальному опорю стабілітрона VD1 зі знаком «мінус». Використання стабілізатора струму замість дозволяє підняти ККД схеми за рахунок зменшення величини вхідної напруги та збільшити її коефіцієнт стабілізації.

Вихідними даними для розрахунку стабілізаторів є: номінальна напруга мережи $U1$, В; відносний відхил напруги мережи як у бік підвищення $a_{макс}$, так і в бік зниження $a_{мін}$; номінальне значення вихідної напруги $U_{вих}$; максимальний та мінімальний струми навантаження $I_{н.макс}$, $I_{н.мін}$; коефіцієнт стабілізації $K_{ст}$; внутрішній опір r ; амплітуда змінної складової вихідної напруги $U_{вихm1}$; граничні значення температури навколишнього середовища $\theta_{окр.мін}$, $\theta_{окр.макс}$, ($^{\circ}C$); температурний коефіцієнт стабілізатора γ , мВ/ $^{\circ}C$.

Практичне заняття 2.

Розрахунок однокаскадного стабілізатора

Схема однокаскадного стабілізатора, що буде розраховано, представлена на рис.1.2.а.

1. Знаючи величину $U_{вих}$, з довідника вибираємо тип стабілітрону VD1 (або тип та кількість послідовно ввімкнених стабілітронів) та визначаємо диференціальний опір $r_{ст1}$, максимальний температурний коефіцієнт $\alpha_{ст}$, граничні струми стабілізації $I_{мін}$, $I_{макс}$, напруги стабілізації $U_{ст1макс}$, $U_{ст1мін}$.

2. Уточнюємо величину вихідної напруги стабілізатора

$$U_{вих} = \frac{U_{ст1мін} + U_{ст1макс}}{2} \quad (1.5)$$

3. Задамося значенням амплітуди змінної складової вхідної напруги a_{\sim} (a_{\sim} дорівнює коефіцієнту пульсацій на вході стабілізатора). Приймаємо $a_{\sim} = 0.02 \div 0.05$.

4. Визначим максимальну величину коефіцієнта стабілізації $K_{ст.макс}$ з (1.3). Величина $I_{ст1мін}$ повинна бути обраною більш ніж мінімальний струм крізь стабілітрон. Переконаємося, що задана величина $K_{ст}$ менша ніж $K_{ст.макс}$. Якщо $K_{ст} > K_{ст.макс}$, необхідно використати схему двохкаскадного стабілізатора (рис. 1.2.б) або схему рис. 1.3.

5. Визначаємо номінальне, мінімальне та максимальне значення вхідної напруги стабілізатора:

$$U_{01} = \frac{U_{ст1макс}}{(1 - a_{мін} - a_{\sim}) \left(1 - \frac{K_{ст}}{K_{ст.макс}}\right)} \quad (1.6)$$

$$U_{01мін} = U_{01}(1 - a_{мін});$$

$$U_{01макс} = U_{01}(1 + a_{макс}).$$

У виразі (1.6) значення $K_{ст}$ необхідно трохи збільшити в порівнянні з заданим, тому що компенсуючі діоди зменшують $K_{ст}$.

6. Величина опору резистора:

$$R_{r1} = \frac{U_{01}(1 - a_{мін} - a_{\sim}) - U_{ст1макс}}{I_{н.макс} + I_{ст1мін}} \quad (1.7)$$

7. Визначаємо максимальне значення та уточнюємо мінімальне значення струмів крізь стабілітрон:

$$I_{ст1макс} = \frac{U_{01макс} - U_{ст1мін}}{R_{r1}} - I_{н.мін} \quad (1.8)$$

$$I_{ст1\min} = \frac{U_{01\min} - U_{ст1\max}}{R_{r1}} - I_{н.\max}.$$

Величина $I_{ст1\max}$ повинна бути меншою ніж гранична величина струму, вказана у довіднику для даного типу стабілітрона.

8. Для стабілізаторів на кремнієвих стабілітронах визначаєм з довідника найбільший температурний коефіцієнт $\alpha_{ст}$, $\%/^{\circ}\text{C}$.

Знаходим абсолютний максимальний температурний коефіцієнт напруги, $\text{мВ}/^{\circ}\text{C}$.

$$\gamma_{ст1\max} = \alpha_{ст1} U_{ст1} \times 10,$$

$$U_{ст1} = \frac{U_{ст1\min} + U_{ст1\max}}{2}.$$

Визначаєм мінімальний температурний коефіцієнт кремнієвого стабілітрона: $\gamma_{ст1\min} = 2 + 1.25(U_{ст1\min} - 6) - 0.5$. Цей вираз дійсний для стабілітронів з напругою стабілізації більш ніж 6В. Якщо $\gamma_{ст1\max}$ більш ніж температурний коефіцієнт стабілізатора γ , використовуємо термокомпенсацію. В якості термокомпенсуючого елемента можна використати діоди або стабілітрони, ввімкнені у прямому напрямку. Компенсуючі діоди вмикаються послідовно з основним стабілітроном. Така термокомпенсація можлива для кремнієвих стабілітронів с позитивним температурним коефіцієнтом.

Обравши тип компенсуючого діода VD_k з графіків рис. 1.4 визначим величини температурних коефіцієнтів γ_k при мініальному $I_{ст1\min}$ та максимальному $I_{ст1\max}$ струмах через стабілітрон: $\gamma_{k.\min}$ визначаєм для струму $I_{ст1\min}$; $\gamma_{k.\max}$ визначаємо для струму, що дорівнює $I_{ст1\max}$.

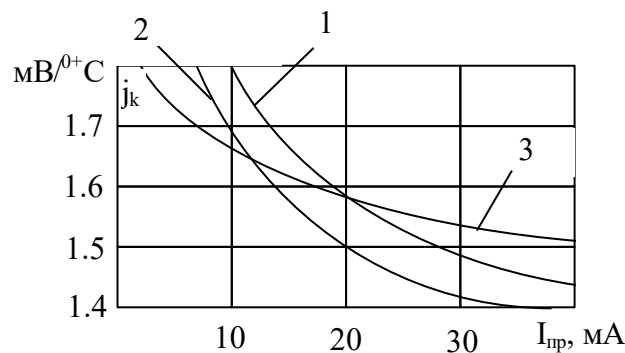


Рис. 1.4. Залежність температурного коефіцієнта напруги діодів Д7А-Д7Ж (1); Д814А-Д814Д (2); Д310 (3).

Визначаєм максимальну та мінімальну кількість компенсуючих діодів:

$$N_{к.\max} = \frac{\gamma_{ст1\max}}{\gamma_{к.\min}}; \quad N_{к.\min} = \frac{\gamma_{ст1\min}}{\gamma_{к.\max}}.$$

Кількість діодів, необхідних для термокомпенсації:

$$N_k = \frac{N_{k.мін} + N_{k.макс}}{2}.$$

Визначим граничні значення температурного коефіцієнта стабілізатора, враховуючи, що γ_k для компенсуючих діодів має розкид ± 0.1 мВ/°С:

$$\gamma_{макс} = \gamma_{ст1макс} - (\gamma_{k.мін} - 0.1)N_k;$$

$$\gamma_{мін} = \gamma_{ст1мін} - (\gamma_{k.макс} - 0.1)N_k.$$

9. Визначаємо коефіцієнт стабілізації та внутрішній опір з у рахуванням параметрів компенсуючих діодів:

$$K_{ст} = \frac{R_{r1} \times U_{вих}}{(r_{ст1} + r_{ст.к} N_k) U_{01}}.$$

Якщо розрахунковий $K_{ст}$ вийшов меншим ніж заданий, то необхідно перерахувати схему стабілізатора, враховуючи сумарний динамічний опір компенсуючих діодів, тобто в усі попередні вирази необхідно замість $r_{ст1}$ підставити $r_{ст1} + r_{ст.к} N_k$;

$$r_i \approx r_{ст} + r_{ст.к} N_k, \quad (1.9)$$

де $r_{ст.к}$ - динамічний опір компенсуючого діода, розмір котрого визначається з графіків рис.4.5 при

$$I_{np} = \frac{I_{ст1мін} + I_{ст1макс}}{2}.$$

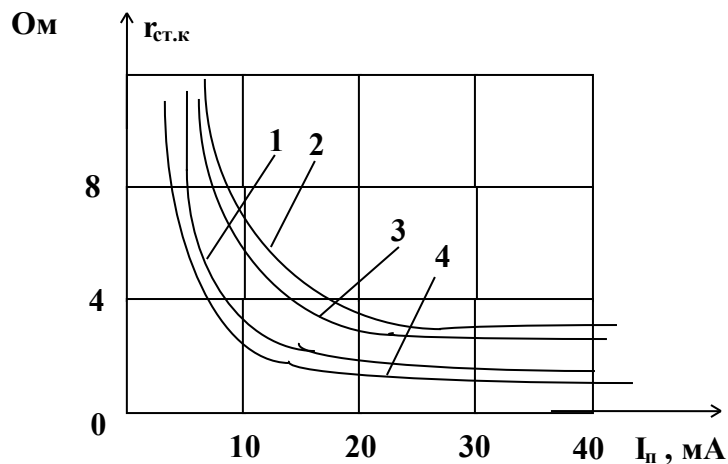


Рис. 1.5. Залежність диференціального опору діодів та стабілітронів, що включено у прямому напрямку:

1-ДЗ10; 2-Д7А-Д7Ж; 3-Д202-Д205; 4-Д814А-Д814Д.

10. Знайдемо розмір змінної складової вихідної напруги:

$$U_{вих.м1} = \frac{a_{\approx} U_{вих}}{K_{\approx}}, \quad (1.10)$$

де a_{\sim} - відносна величина пульсацій на вході стабілізатора;

K_{\sim} - коефіцієнт згладжування пульсацій, приблизно рівний $K_{ст}$.

11. Визначим номінальний та мінімальний ККД стабілізатора:

$$\eta = \frac{U_{вих} I_{н.макс}}{U_{01} \frac{U_{01} - U_{вих}}{R_{r1}}} ;$$

$$\eta_{мін} = \frac{U_{вих} I_{н.макс}}{U_{01макс} \frac{U_{01макс} - U_{вих}}{R_{r1}}} .$$

12. Визначим максимальний розмір струму, який споживає стабілізатор від випрямляча:

$$I_{0макс} = \frac{U_{01макс} - U_{ст1мін}}{R_{r1}} \quad (1.11).$$

Практичне заняття 3.

Розрахунок двокаскадного стабілізатора

Схема двокаскадного стабілізатора, що буде розраховано, представлена на рис.1.2.б.

1. Обираєм тип стабілітрону VD1 (див. п 1 розрахунку однокаскадного стабілізатора).
2. З виразу (1.5) уточнюємо величину $U_{вих}$.
3. Визначаємо розмір вихідної напруги першого каскаду U_1 . Припускаєм, що $U_1 = 2U_{вих}$.
4. Відповідно U_1 з довідника або додатка Д4.2 обираєм стабілітрони VD2, VD3 та визначаємо їх параметри: $r_{ст2}$, $r_{ст3}$, $\alpha_{ст2}$, $\alpha_{ст3}$, $U_{ст2макс}$, $U_{ст3макс}$, $U_{ст2мін}$, $U_{ст3мін}$, $I_{2мін}$, $I_{2макс}$, $I_{3мін}$, $I_{3макс}$.

Уточнюємо величину U_1 :

$$U_1 = \frac{U_{ст2макс} + U_{ст2мін} + U_{ст3макс} + U_{ст3мін}}{2} .$$

5. Визначаєм опір резистора R_{r1} :

$$R_{r1} = \frac{U_{ст2мін} + U_{ст3мін} - U_{ст1макс}}{I_{ст1мін} + I_{н.макс}} .$$

Величина $I_{ст1мін}$ повинна бути обрана більш мінімального струму стабілітрона VD1.

6. Задаємся розміром a_{\sim} (див. п.3 розрахунку однокаскадного стабілізатора).

Визначаємо коефіцієнт стабілізації другого каскаду:

$$K_{ст2} = \frac{R_{r1} U_{вих}}{r_{ст1} U_1} .$$

Знаходимо необхідний розмір коефіцієнта стабілізації першого каскаду:

$$K_{cm1} = \frac{K_{cm}}{K_{cm2}}.$$

Визначаємо $K_{ст1макс}$:

$$K_{cm1макс} = \frac{U_1(1 - a_{мін} - a_{\approx})}{(I_{н.макс} + I_{cm1мін} + I_{cm23мін})(r_{cm2} + r_{cm3})}.$$

Розмір $I_{ст23мін}$ повинен бути більш мінімального струму крізь стабілітрони VD2, VD3. Переконаємося, що $K_{ст1макс} > K_{ст1}$.

8. З (1.6) визначимо U_{01} , $U_{01макс}$, $U_{01мін}$. У виразі (1.6) замість $K_{ст}$ та $K_{стмакс}$ підставляємо відповідно $K_{ст1}$, $K_{ст1макс}$, а замість $U_{ст1макс}$ - $(U_{ст2макс} + U_{ст3макс})$.

9. Визначаємо розмір R_{r2} :

$$R_{r2} = \frac{U_{01}(1 - a_{мін} - a_{\approx}) - (U_{ст2макс} + U_{ст3макс})}{I_{н.макс} + I_{cm1мін} + I_{cm23мін}}.$$

10. Визначаємо величини $I_{ст1макс}$, $I_{ст1мін}$, $I_{ст23макс}$:

$$I_{cm23макс} = \frac{U_{01макс} - (U_{ст2мін} + U_{ст3мін})}{R_{r2}} - I_{cm1мін} - I_{н.макс}.$$

Розміри $I_{ст1макс}$, $I_{ст1мін}$ визначаємо з (1.8), заміняючи $U_{01макс}$ на $(U_{ст2макс} + U_{ст3макс})$; $U_{01мін}$ на $(U_{ст2мін} + U_{ст3мін})$.

Значення $I_{ст23макс}$ та $I_{ст1макс}$ повинні бути меншими за максимально допустимі струми обраних стабілітронів.

11. Розрахунок термокомпенсації та визначення $\gamma_{макс}$ та $\gamma_{мін}$ (див. п.8 розрахунку однокаскадних стабілізаторів).

12. Визначаємо коефіцієнт стабілізації та внутрішній опір стабілізатору:

$$K_{cm} = \frac{R_{r1} R_{r2}}{(r_{cm1} + N_{\kappa} r_{cm,\kappa})(r_{cm2} + r_{cm3})} \times \frac{U_{вих}}{U_{01}}.$$

Розмір $r_{ст,\kappa}$ визначається з графіків рис. 1.5 при

$$I_{np} = \frac{I_{cm1мін} + I_{cm1макс}}{2}.$$

13. Розмір r_i визначимо з виразу (1.9).

14. Визначимо η та $\eta_{мін}$:

$$\eta = \frac{U_{вих} I_{н.макс}}{U_{01} \frac{U_{01макс} - U_1}{R_{r2}}};$$

$$\eta_{мін} = \frac{U_{вих} I_{н.макс}}{U_{01} \frac{U_{01макс} - U_1}{R_{r2}}}.$$

15. У виразі (1.11) замінімо $U_{ст1мін}$ на $(U_{ст2мін} + U_{ст3мін})$, R_{r1} на R_{r2} , та знайдемо $I_{0макс}$.

Практичне заняття 4.

Транзисторні стабілізатори постійної напруги з безперервним регулюванням.

Компенсаційні стабілізатори постійної напруги представляють собою систему автоматичного регулювання, яка забезпечує сталість вихідної напруги при зміні напруги мережі, струму навантаження, а також при інших зовнішніх збуреннях (частота струму мережі живлення, характер навантаження, температура зовнішнього середовища, вологість та ін.). У залежності від способу виконання регулюючого елементу стабілізатори розділяються на послідовні та паралельні. У стабілізаторів першого типу регулюючий елемент увімкнено послідовно з навантаженням, у стабілізаторів другого типу - паралельно (рис.1.6).

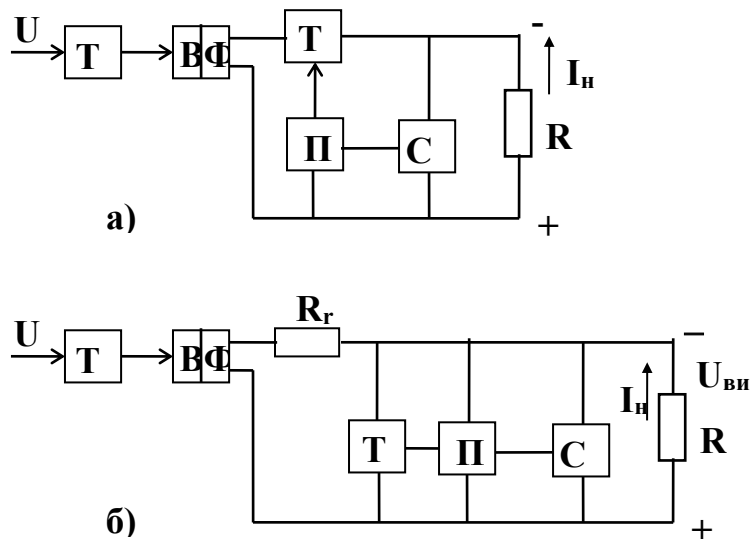


Рис. 1.6. Структурні схеми стабілізаторів з послідовним (а) та паралельним ввимкненням регулюючого елементу (б).

Стабілізатор послідовного типу (рис. 1.6а) отримує живлення від мережі змінного струму з кола: трансформатор T_r , випрямляч В та фільтр Ф. Стабілізатор складається з регулюючого елементу Т, який увімкнено послідовно з навантаженням, схеми порівняння СП та підсилювача постійного струму П. Схема порівняння складає собою джерело опорної напруги та порівнюючий подільник. У схемі порівнюються вихідна та опорна напруга. Сигнал різниці цих двох напруг подається на вхід підсилювача постійного струму. При зміні вихідної напруги на виході схеми порівняння

з'являється сигнал різниці, який підсилюється підсилювачем постійного струму та надходить на вхід регулюючого елемента. Зміна сигналу на вході регулюючого елемента спричиняє зміну напруги на ньому, і вихідна напруга змінюється до первісного розміру з визначеною ступінню точності.

Паралельна схема стабілізатора (рис. 1.6.б) складається з тих самих елементів, що й послідовна. Відмінність полягає у тім, що регулюючий елемент увімкнено паралельно навантаженню, а послідовно з ним увімкнен резистор R_r . При зміні вихідної напруги з'являється сигнал на виході схеми порівняння, підсилюється підсилювачем постійного струму та впливає на регулюючий елемент таким чином, що спричиняє до зміни спаду напруги на R_r . В наслідок цього компенсуються зміни вихідної напруги з визначеною ступінню точності.

Якісні параметри розглянутих схем приблизно однакові. Схема з послідовним увімкненням регулюючого елемента має більший ККД. Але якщо у якості баластного опору використати дросель та увімкнути його у коло змінного струму, то ККД паралельної схеми також можливо значно збільшити. Перевага паралельної схеми полягає у тому, що при постійній вхідній напрузі струм, який споживає стабілізатор від випрямляча, не залежить від значення струму навантаження. Ця властивість паралельного стабілізатору особливо цінна у тому випадку, коли струм навантаження має імпульсний характер.

Транзисторні стабілізатори мають наступні основні властивості, які визначають їх використання:

1. Забезпечення високої точності стабілізації вихідної напруги. При цьому стабілізатор однаково добре ослаблює як кінцеву зміну вхідної напруги, так і змінну складову (пульсацію).
2. Малий динамічний внутрішній опір.

Недоліком стабілізаторів є порівняно низький ККД (0.5-0.7), який обумовлений втратою потужності на регулюючому елементі та в резисторі, що гасить надлишкову напругу (схема мал. 1.6.б). Незважаючи на вказаний недолік, в теперішній час стабілізатори такого типу широко застосовуються для живлення радіоапаратури та апаратури зв'язку.

Розглянемо послідовну схему транзисторного стабілізатора (рис. 1.7).

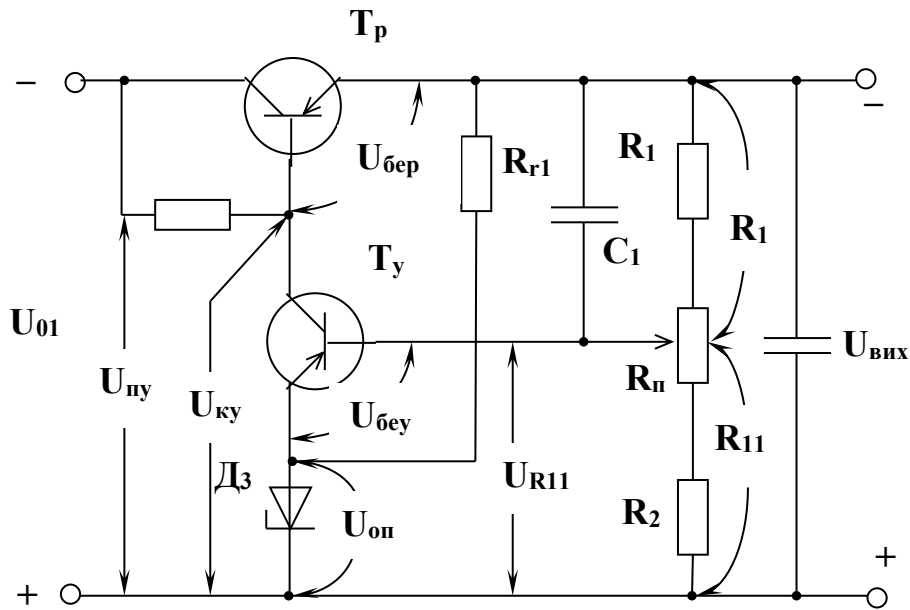


Рис. 1.7. Схема транзисторного стабілізатора з послідовним ввімкненням керуючого елемента.

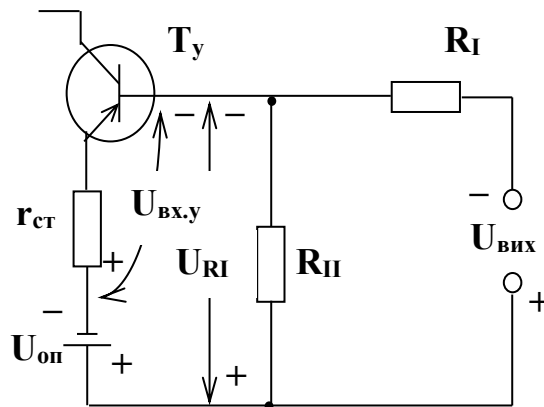


Рис. 1.8. Схема підсилювача та порівнюючого

Стабілізатор складається з регулюючого транзистору T_p , підсилювача постійного струму T_y , R_y , джерела опорної напруги D_3 та подільника напруги R_1 , $R_п$, R_2 , C_1 .

Принцип дії схеми олягає у наступному. При зміні входньої напруги U_{01} , наприклад її збільшенні, в перший момент починає збільшуватися вихідна напруга $U_{вих}$, що призводить до збільшення напруги U_{R11} на нижньому плечі подільника. Напруга U_{R11} зрівнюється з опорною напругою стабілітрона D_3 . Збільшення напруги U_{R11} призводить до збільшення негативного потенціалу на базі транзистора T_y по відношенню його до емітера. Збільшуються струми бази та колектора транзистора T_y , і зменшується негативний потенціал на базі

транзистора T_p відносно його емітера. Струм бази транзистора T_p зменшується, що призводить до збільшення напруги на переході колектор-емітер транзистора T_p .

Напруга на виході стабілізатора зменшується до початкового значення з визначеною ступінню точності. У випадку зміни струму навантаження, наприклад її збільшення, вихідна напруга в перший момент починає зменшуватися за рахунок збільшення падіння напруги на переході колектор-емітер регулюючого транзистора T_p . Це викликає зменшення напруги $U_{RП}$ на нижньому плечі подільника. Зменшується негативний потенціал бази транзистора T_y , зменшуються його базовий та колекторний струми. Струм бази транзистора T_p збільшується, що призводить до зменшення напруги на переході колектор-емітер транзистора T_p . Вихідна напруга збільшується до початкового розміру. Регулювання вихідної напруги у схемі здійснюється потенціометром R_p . При переміщенні повзунка потенціометра у напрямку мінусової шини стабілізатора збільшується напруга $U_{RП}$, що спричиняє до збільшення струмів бази та колектора транзистора T_y . Струм бази транзистора T_y зменшуються, збільшується напруга $U_{кe2}$, і напруга на виході стабілізатора зменшується. При переміщенні повзунка потенціометра в бік плюсової шини напруга на виході стабілізатора збільшується.

Заради визначення основних параметрів схеми знайдем приріст вихідної напруги стабілізатора. З схеми рис.1.7 отримаємо

$$\Delta U_{вих} = \Delta U_{01} - \Delta I_{кр} r_{кр} + K_p \Delta U_{бер}.$$

Вважаючи, що $\Delta I_{кр} \approx \Delta I_n$, знаходимо

$$\Delta U_{вих} = \Delta U_{01} - \Delta I_n r_{кр} + K_p \Delta U_{бер} \quad (1.12),$$

де $r_{кр}$ - опір колектора транзистора T_p у схемі з спільним емітером; K_p - коефіцієнт підсилення транзистора T_p по нарузі; $\Delta U_{бер}$ - приріст напруги на переході база-емітер транзистора T_p ; $\Delta I_{кр}$, ΔI_n - приріст струму колектора T_p та струму навантаження відповідно.

Приріст напруги $\Delta U_{бер}$ дорівнює різниці приростів напруг на колекторі транзистора T_y та на виході стабілізатора, т.ч.

$$\Delta U_{бер} = \Delta U_{кy} - \Delta U_{вих} \quad (1.13)$$

Завдяки тому, що підсилювач постійного струму отримує живлення від змінної напруги $U_{пу}$, напруга на колекторі транзистора буде змінюватися за рахунок напруги живлення, а також за рахунок приросту напруги на його базі:

$$\Delta U_{кy} = \frac{\Delta U_{пу} r_{кy}}{R_y + r_{кy}} - K_y \Delta U_{ex.y} \quad (1.14)$$

де r_{ky} , K_y - опір колектора транзистора T_y у схемі з спільним емітером та коефіцієнт підсилення підсилювача постійного струму;

$\Delta U_{вх.у}$ - приріст напруги на вході підсилювача постійного струму;

$\Delta U_{пy}$ - приріст напруги живлення підсилювача постійного струму.

Розмір $\Delta U_{вх.у}$ можна визначити з схеми рис. 1.8, на якій зображені схема порівняння та підсилювач постійного струму стабілізатора. Стабілітрон D_3 у схемі був замінений еквівалентним джерелом з напругою $U_{оп}$ та внутрішнім опором, який дорівнює диференціальному опору стабілітрона. З виразу

$$\begin{aligned} U_{ex.y} &= U_{R_{II}} - U_{on} = \\ &= U_{вих} \frac{R_{II} R_{ex.y}}{(R_I + R_{II})(R_{ex.y} + \frac{R_I R_{II}}{R_I + R_{II}})} - U_{on} \frac{R_{ex.y}}{R_{ex.y} + \frac{R_I R_{II}}{R_I + R_{II}}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

отримуємо $\Delta U_{вх.у} = \Delta U_{вих} \alpha \alpha' - \Delta U_{оп} \alpha'$,

де $R_{вх.у}$ - вхідний опір підсилювача постійного струму;

$\alpha = \frac{R_I}{R_I + R_{II}}$ - коефіцієнт передачі подільника;

$\alpha' = \frac{R_{ex.y}}{R_{ex.y} + \frac{R_I R_{II}}{R_I + R_{II}}}$ - коефіцієнт, який враховує вплив вхідного опору підсилювача на коефіцієнт передачі подільника.

З (1.12) - (1.15) знайдем приріст вихідної напруги у кінцевому вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta U_{вих} &= \frac{\Delta U_{01}}{1 + K_p K_y \alpha \alpha' + K_p} + \frac{\Delta U_{пy} r_{ky} K_p}{(R_y + r_{ky})(1 + K_p K_y \alpha \alpha' + K_p)} + \\ &+ \frac{\Delta U_{он} \alpha' K_p K_y}{1 + K_p K_y \alpha \alpha' + K_p} - \frac{\Delta I_n r_{кp}}{1 + K_p K_y \alpha \alpha' + K_p} \end{aligned}$$

так як $K_p K_y \alpha \alpha' \gg (1 + K_p)$, то

$$\Delta U_{вих} = \frac{\Delta U_{01}}{K_p K_y \alpha \alpha'} + \frac{\Delta U_{пy} r_{ky}}{(R_y + r_{ky}) K_y \alpha \alpha'} + \frac{\Delta U_{он}}{\alpha} - \frac{\Delta I_n r_{кp}}{K_p K_y \alpha \alpha'} \quad (1.16)$$

З виразу (1.16) бачимо, що розмір приросту вихідної напруги залежить від приростів вхідної напруги, напруги живлення підсилювача, опорної напруги та струму навантаження. Оскільки $\Delta I_n = 0$; $\Delta U_{он} = 0$; $\Delta U_{пy} = \Delta U_{01}$, з (1.16) знайдем вираз для коефіцієнту стабілізації схеми рис. 1.7:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{01}}{\Delta U_{вих}} \times \frac{U_{вих}}{U_{01}} = \frac{K_p K_y \alpha \alpha' (R_y + r_{ky}) U_{вих}}{U_{01} (r_{ky} + R_y + r_{ky} K_p)} \quad (1.17)$$

так як $r_{ky} K_p \gg (R_y + r_{ky})$, то

$$K_{cm} \approx \frac{K_y \alpha \alpha' (R_y + r_{ky})}{r_{ky}} \times \frac{U_{вих}}{U_{01}}.$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі регулюючого транзистора

$$K_p = \frac{\Delta U_{кер}}{\Delta U_{бep}} \approx \frac{\Delta U_{01}}{\Delta U_{бep}} \approx \frac{h_{21ep} r_{кр}}{h_{11ep}},$$

де h_{21ep} - статичний коефіцієнт передачі струму транзистора T_p ;

$h_{11ep} = r_{бp} + r_{ep} (1 + h_{21ep})$ - вхідний опір транзистора T_p ;

$r_{бp}$, r_{ep} , $r_{кр}$ - опір бази, емітера та колектора транзистора T_p у схемі з спільним емітером.

Коефіцієнт підсилення підсилювача постійного струму:

$$K_y = \frac{h_{21ey} r_{ky} \langle R_y | R_{ny} \rangle}{(r_{ky} + \langle R_y | R_{ny} \rangle) R_{ex.y}};$$

$$R_{ex.y} = h_{11ey} + r_{cm3} (h_{21ey} + 1) = r_{бy} + (r_{ey} + r_{cm3}) (h_{21ey} + 1);$$

$$R_{ny} = h_{11ep} + \langle R_n | r_{кр} \rangle h_{21ep},$$

де h_{11ey} - вхідний опір транзистора T_y у схемі з спільним емітером;

r_{cm3} - диференціальний опір стабілітрона ДЗ;

$r_{кр}$, r_{ky} - опір колекторів транзисторів T_y , T_p у схемі з спільним емітером;

R_{ny} - опір, який шунтує вихід підсилювача.

Прирівнюючи у виразі (1.16) $\Delta U_{оп}$, $\Delta U_{пу}$, ΔU_{01} до нуля, знайдемо внутрішній опір стабілізатора:

$$r_i = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_n} = \frac{-h_{11ep}}{h_{21ep} K_y \alpha \alpha'} = \frac{-1}{S_p K_y \alpha \alpha'} \quad (1.18),$$

де S_p - крутість регулюючого транзистора.

Окрім зменшення кінцевих приростів вхідних напруг, схема транзисторного стабілізатора має властивість фільтра, тобто зменшує змінну складову вхідної напруги. У випадку відсутності у схемі рис. 1.7 конденсатору С1 коефіцієнт згладжування стабілізатора дорівнює приблизно коефіцієнту стабілізації ($K_{\approx} = K_{ст}$). Конденсатор С1 встановлено паралельно верхньому плечу подільника, і таким чином він шунтує його за змінною складовою. Якщо розмір опору ємності для змінної складової багато менший за опір верхнього плеча подільника R1, то коефіцієнт передачі подільника за змінною складовою наближається до одиниці та K_{\approx} більш $K_{ст}$. Отже ввімкнення конденсатору С1 зводить до зменшення змінної складової напруги. Прирівнюючи $\alpha=1$ в (1.17), можливо знайти коефіцієнт згладжування K_{\approx} у випадку, якщо верхнє плече подільника зашунтоване конденсатором С1. Розмір ємності конденсатора С1 мало впливає на пульсацію вихідної напруги, тому що внутрішній опір стабілізатора r_i значно

менший за опір конденсатора C_H для змінної складової. Конденсатор C_H ослаблює викиди вхідної напруги стабілізатора при імпульсній зміні струму навантаження.

Стабільність опорної напруги значною мірою впливає на постійність вихідної напруги. Як бачимо з (1.16) при $\Delta I_H=0$, $\Delta U_{пу}=0$, $\Delta U_{01}=0$

$$\Delta U_{вих} = \frac{\Delta U_{оп}}{\alpha}.$$

Оскільки коефіцієнт передачі подільника завжди менший за одиницю, зміна вихідної напруги більше зміни опорної напруги. При живленні підсилювача постійного струму від вхідної напруги стабілізатора ($U_{пу}=U_{01}$) схема буде мати низький коефіцієнт стабілізації за рахунок нестабільності живлення підсилювача. Як видно з виразу (1.16), приріст вихідної напруги або помилку стабілізатора можна зменшити за рахунок збільшення опору колекторного навантаження R_y підсилювача постійного струму або поліпшенням стабільності його напруги живлення ($\Delta U_{пу}=0$). Заради зменшення помилки стабілізатора у схемі рис. 1.9 замість резистора R_y у колекторний ланцюг транзистора T_y вувімкнено стабілізатор струму, який складається з транзистора T_2 , резисторів R_{r3} , R'_e та стабілітрона D_5 . Стабілізатор струму представляє собою емітерний повторювач, на вхід якого надходить напруга стабілітрона D_5 . Напруга на стабілітроні D_5 змінюється незначно при зміні вхідної напруги. Напруга на резисторі R'_e також змінюється незначно, тому що вона приблизно дорівнює напрузі на стабілітроні D_5 . Завдяки постійності напруги на резисторі R'_e струми емітера та колектора транзистора T_2 практично не змінюються при зміні вхідної напруги.

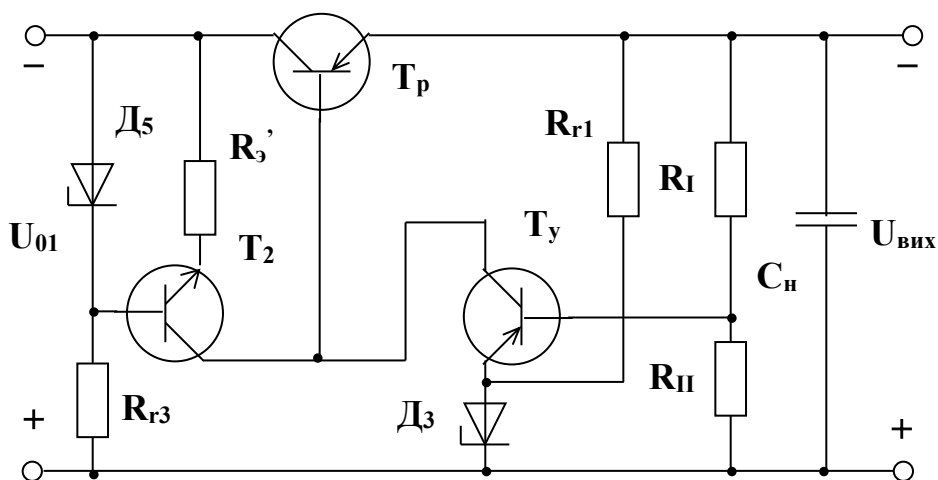


Рис. 1.9. Схема транзисторного стабілізатора з послідовним ввімкненням регулюючого

Стабілізатор струму має великий внутрішній опір, та його використання еквівалентне увімкненню у колекторне коло транзистора T_y резистора з дуже великим опором R_y . У цьому випадку еквівалентний опір колекторного навантаження транзистора T_y :

$$R_{y.екв} = \frac{h_{21e2}r_{k2}(R_{r3}R'_e)}{R_{r3}R'_e + r_{cm5}r_{k2}h_{21e2}} \quad (1.19),$$

де h_{21e2} , r_{k2} - статичний коефіцієнт передачі струму та опір колектора у схемі з спільним емітером транзистора T_2 ;

r_{cm5} - диференціальний опір стабілітрона D_5 .

З виразу (1.19) бачим, що значення $R_{y.екв}$ не може бути більшим за добуток $h_{21e2}r_{k2}$. Це можливо, якщо диференціальний опір стабілітрона D_5 дорівнює нулю ($r_{cm5}=0$). Замінивши в виразах (1.16), (1.17) R_y на $R_{y.екв}$ можливо визначити помилку стабілізатора та коефіцієнт стабілізації цей схеми.

Для зменшення впливу напруги живлення підсилювача в схемі рис. 1.10 підсилювач постійного струму отримує живлення від додаткового джерела, в якості якого використовується параметричний стабілізатор на кремнієвому стабілітроні. Напруга додаткового джерела підсумовується з вихідною напругою стабілізатора.

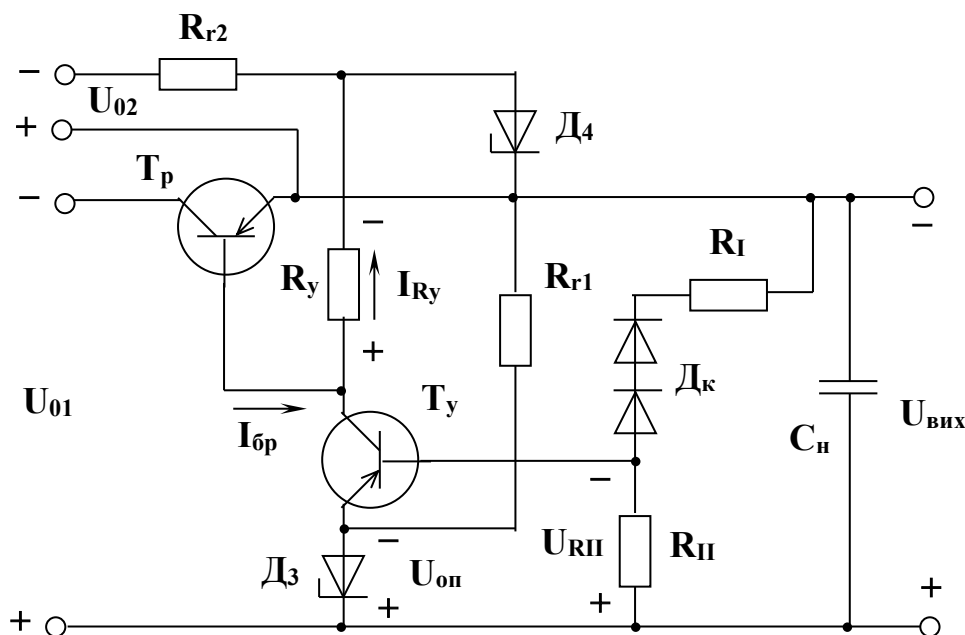


Рис. 1.10. Схема транзисторного стабілізатора з послідовним увімкненням регулюючого елемента з додатковим живленням.

При зміні вихідної напруги стабілізатора, наприклад збільшенні, збільшується напруга на нижньому плечі подільника U_{rII} . Потенціал бази

транзистора T_y по відношенню до емітера стає більш негативним, а його базовий I_{by} та колекторний I_{ky} струми зростають. Напруга на резисторі R_y в цій схемі дорівнює різниці напруг додаткового джерела та на переході база-емітер транзистора T_p , тобто $(U_{ст4} - U_{бер})$. Якщо урахувати, що напруга на переході база-емітер змінюється незначно завдяки нелінійності вхідної характеристики транзистора, а напруга $U_{ст4}$ незмінна за розміром, то напругу U_{ry} можна вважати величиною постійною. Внаслідок постійності напруги U_{ry} суму струмів $I_{ry} = I_{ky} + I_{br}$, які протікають через резистор R_y , можна вважати також постійною величиною. Зростання струму I_{ky} викликає зменшення струму бази I_{br} транзистора T_p , тому що $I_{ry} = \text{const}$. Зменшення струму бази I_{br} призводить до збільшення напруги на переході емітер-колектор транзистора T_p , та вихідна напруга стабілізатора зменшується до свого початкового розміру.

Стабілізація напруги живлення підсилювача постійного струму дає можливість зменшити зміну вихідної напруги при зміні вхідної напруги. Коефіцієнти стабілізації та згладжування пульсацій зростають.

З (1.17) впливає, якщо прирівняти ΔU_n , $\Delta U_{оп}$, $\Delta U_{пу}$ до нуля, то можливо знайти коефіцієнт стабілізації. Коефіцієнт згладжування пульсацій схеми дорівнює приблизно коефіцієнту стабілізації. Внутрішній опір, так само як і для попередніх схем, визначається з виразу (1.18).

Як зазначалось, розмір помилки $\Delta U_{вих}$ на виході стабілізатора значною мірою залежить від стабільності опорної напруги (напруги стабілітрону D_3).

Зміна навколишньої температури змінює напругу на стабілітроні. Величина зміни напруги стабілітрона залежить від розміру його температурного коефіцієнта.

Якщо температурний коефіцієнт стабілітрона позитивний, то при зростанні навколишньої температури опорна напруга зростає, що викликає зменшення негативного потенціалу на базі транзистора T_y (див. рис. 1.10). Внаслідок цього зменшуються струми бази та колектора транзистора T_y , збільшується струм бази I_{by} та зменшується напруга на переході колектор-емітер транзистора T_y , що зводить до зростання вихідної напруги стабілізатора.

Заради зменшення змін вихідної напруги, які пов'язані зі зміною навколишньої температури, у схемах передбачається температурна компенсація. У схемі рис. 1.10 термокомпенсуючими елементами є діоди або стабілітрони D_k , які ввімкнені у прямому напрямку у верхнє плече подільника.

Діоди та стабілітрони, ввімкнені у прямому напрямку, мають негативний температурний коефіцієнт. Зростання навколишньої температури

спричиняє зменшення напруги на діодах D_k , а напруга U_{R11} збільшується, що внаслідок приводить до зниження вихідної напруги. Таким чином, зміни вихідної напруги, які пов'язані зі змінами напруги стабілітрона D_3 , протилежні за знаком змінам вихідної напруги, які пов'язані зі змінами напруги на компенсуючих діодах D_k . Така температурна компенсація можлива, якщо температурний коефіцієнт стабілітрона D_3 позитивний. У випадку, якщо температурний коефіцієнт стабілітрона негативний, в одне з плеч подільника вмикається терморезистор, котрий й забезпечує температурну компенсацію.

Якщо порівняти схеми рис. 1.7, 1.9, 1.10, необхідно відзначити, що найбільший коефіцієнт стабілізації має схема з додатковим стабілізованим джерелом живлення. Коефіцієнт згладжування в усіх розглянутих схемах дорівнює приблизно коефіцієнту стабілізації (якщо конденсатор $C1$ відсутній). Внутрішній опір усіх схем приблизно однаковий. В цих схемах джерело опорної напруги увімкнено в коло емітера підсилюючого транзистора T_y . Напруга на переході колектор-емітер транзистора T_y дорівнює різниці $U_{вих}-U_{оп}$. З цього випливає, що для забезпечення необхідної напруги на переході колектор-емітер транзистора T_y необхідно, щоб вихідна напруга у розглянутих схемах завжди була більш ніж напруга опорна.

Заради отримання малих вихідних напруг $U_{вих}<U_{оп}$ та у випадку, якщо необхідне широке регулювання вихідної напруги, використовується схема рис. 1.11. У цій схемі джерело опорної напруги підключено до плюсової шини стабілізатора, а порівнюючий подільник R_1, R_{II} отримує живлення від сумарної напруги $U_{вих}+U_{оп}$. При зміні вихідної напруги змінюється напруга U_{RII} на нижньому плечі подільника, змінюється потенціал бази транзистора T_y , отже змінюється напруга на переході база-емітер регулюючого транзистора T_p . Зміна напруги на переході база-емітер транзистора T_p викликає зміну напруги на колекторі, і вихідна напруга повертається до свого початкового значення.

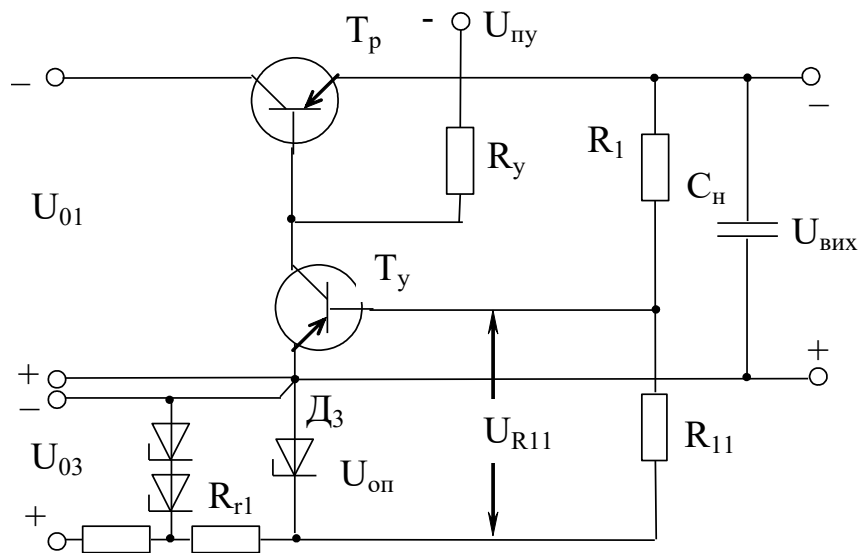


Рис. 1.11. Схема транзисторного стабілізатора на низькі вихідні напруги.

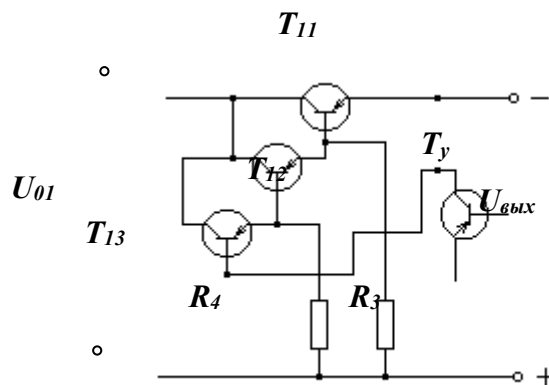


Рис. 1.12. Схема ввімкнення складового транзистора.

Оскільки зміна вихідної напруги значною мірою залежить від стабільності опорної напруги, у схемі використовується двохкаскадний параметричний стабілізатор.

У розглянутих схемах у якості регулюючого елемента використано один транзистор. У зв'язку з тим, що при великих струмах навантаження струм бази регулюючого транзистора може досягати значного розміру, для узгодження потужного регулюючого транзистора з малопотужним підсилювачем постійного струму у схемах стабілізаторів застосовується складений регулюючий транзистор. На рис. 1.12 надана схема ввімкнення складового транзистора. Резистори R_3 , R_4 потрібні для забезпечення нормальних робочих режимів транзисторів T_{12} , T_{13} . Для визначення

параметрів схеми складовий транзистор замінюють T_p з еквівалентними параметрами.

Транзисторні стабілізатори з паралельним ввімкненням регулюючого елемента доцільно використовувати при малих змінах напруги мережі та імпульсних змінах струму навантаження.

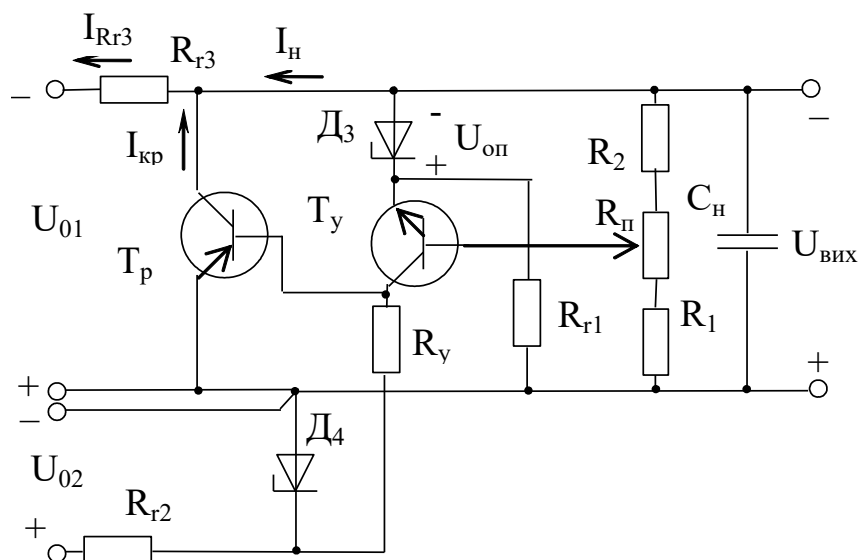


Рис. 1.13. Схема транзисторного стабілізатора з паралельним ввімкненням регулюючого транзистора.

Основними перевагами паралельних стабілізаторів є незмінність вхідного струму при змінному струмі навантаження та постійною вхідною напругою та нечутливість до коротких замиканій на виході.

Схема паралельного стабілізатора зображена на рис. 1.13. Стабілізатор складається з регулюючого транзистора T_p ; резистора R_{r3} ; підсилювача постійного струму T_y , R_y ; джерела опорної напруги D_3 , R_{r1} ; подільника напруги R_1 , $R_{п}$, R_2 ; вихідного конденсатора $C_{н}$ та додаткового джерела D_4 , R_{r2} для живлення підсилювача постійного струму.

Вихідна напруга стабілізатора $U_{вих}$ дорівнює різниці напруг вхідної напруги та падіння напруги на резисторі R_{r3} : $U_{вих}=U_{01}-U_{R3}$. Струм, який протікає через баластний опір $I_{R3}=I_{кр}+I_{н}$, де $I_{кр}$ - струм колектора регулюючого транзистора; $I_{н}$ - струм навантаження.

При зміні вхідної напруги, наприклад зростанні, в перший момент починає зростати напруга на виході. Збільшення напруги на виході зводить до зростання напруги $U_{Rп}$, зростає позитивний потенціал на базі транзистора T_y , зростають його базовий та колекторний струми. Збільшення колекторного струму транзистора T_y спричиняє зріст напруги на резисторі R_y , зростає мінус

на базі регулюючого транзистора T_p , та його колекторний струм збільшується. Зріст колекторного струму транзистора T_p зводить до збільшення струму I_{R3} та напруги U_{R3} на резисторі R_{r3} . Напруга на виході стабілізатора зменшується до початкового розміру з визначеною ступінню точності. При зміні струму навантаження в перший момент змінюється вихідна напруга, а потім схема працює відповідно до вищевикладеного. Приріст струму навантаження викликає рівний за розміром та протилежний за знаком приріст струму колектора регулюючого транзистора T_p . У результаті при постійній вхідній напрузі вхідний струм стабілізатора не змінюється. Регулювання вихідної напруги в схемі, так само як у послідовних стабілізаторах, здійснюється потенціометром $R_{п}$, який увімкнено у коло подільника. Параметри схеми (коефіцієнт стабілізації, внутрішній опір) можна визначити з наступних виразів:

$$K_{cm} = \frac{K_y \alpha \alpha' S_p}{R_{r3}} \times \frac{U_{вих}}{U_{01}} = \frac{r_i}{R_{r3}} \times \frac{U_{вих}}{U_{01}} \quad (1.20);$$

$$r_i = -\frac{1}{K_y \alpha \alpha' S_p} \quad (1.21),$$

де K_y - коефіцієнт підсилення підсилювача постійного струму;

$$\alpha = \frac{R_{II}}{R_I + R_{II}} - \text{коефіцієнт передачі подільника};$$

$$\alpha' = \frac{R_{ex.y}}{R_{ex.y} + \frac{R_I R_{II}}{R_I + R_{II}}} - \text{коефіцієнт, який враховує вплив вхідного опору}$$

підсилювача на коефіцієнт передачі подільника; S_p - крутість регулюючого транзистора.

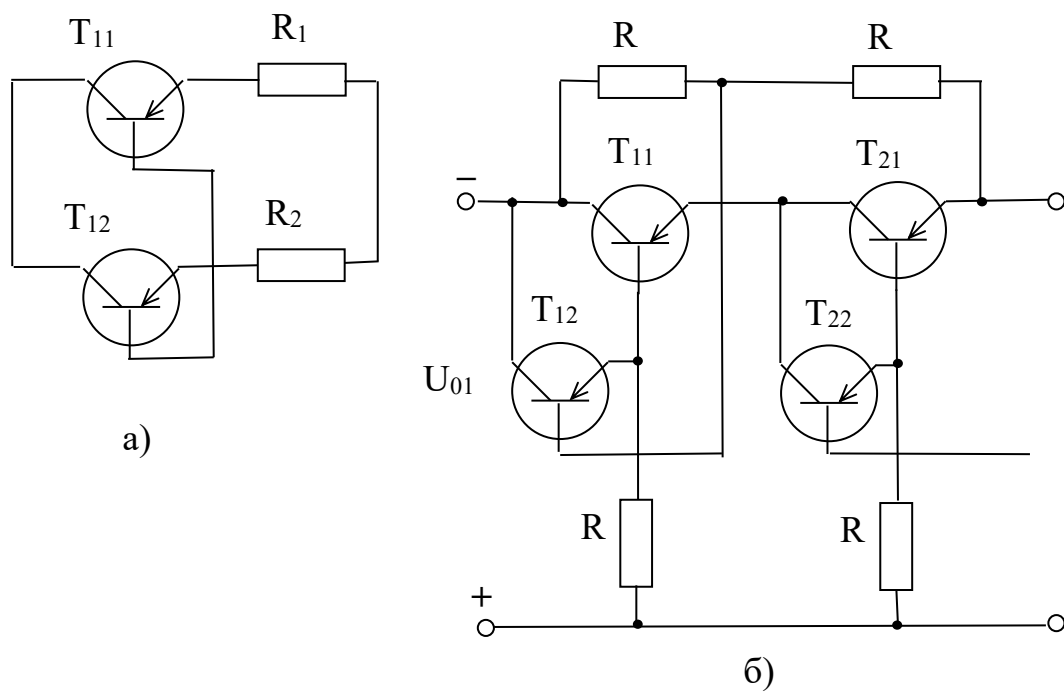


Рис. 1.14. Схеми увімкнення регулюючих транзисторів:
 а – паралельне; б – послідовне.

Як видно з (1.20), коефіцієнт стабілізації пропорційний відношенню опорів, так само як у параметричних стабілізаторів. Основним енергетичним показником стабілізаторів є ККД. У послідовних стабілізаторів ККД трохи більше, ніж у паралельних, оскільки від джерела живлення споживається менший струм. В транзисторних стабілізаторах регулюючий транзистор обирають з максимальною напругою на переході колектор-емітер, максимальним струмом та максимальною потужністю розсіювання. Діапазон допустимих напруг, струмів та потужностей транзисторів, які виробляє промисловість достатньо велика. Однак не завжди вдається підібрати за напругою, струму або потужністю один силовий транзистор для роботи в стабілізаторі. Можливим виходом у таких випадках є паралельне або послідовне увімкнення регулюючих транзисторів. На рис.1.14а зображено паралельне увімкнення двох транзисторів. Таке увімкнення застосовується заради розвантаження транзисторів по струму та потужності. Для вирівнювання струму транзисторів в кола їх емітерів увімкнені симетричні опори. Послідовне увімкнення транзисторів (рис.1.14б) дозволяє зменшити напругу на переході колектор-емітер та знизити потужність, яка на них розсіюється. Вирівнювання напруг здійснюється за допомогою подільника напруг. Максимальна потужність, яка розсіюється без радіатора, для потужних вітчизняних транзисторів для навколишньої температури 40-50⁰С складає 1,5-2,5Вт. У стабілізаторах на регулюючому транзисторі може

розсіюватись потужність, яка значно перевищує вказані значення. Від розміру потужності, яка розсіюється на регулюючому транзисторі, залежить температура його колекторного переходу, яка не повинна перевищувати гранично допустимого значення. Для германієвих транзисторів вона складає 85-100⁰С, для кремнієвих 150-200⁰С. Підвищення температури переходу над граничною може викликати тепловий пробій транзистора.

Для відводу тепла транзистори установлюють на радіатори. Температура переходу буде тим нижче, чим більша ефективність радіатора. У свою чергу ефективність радіатору залежить від площі його поверхні, матеріалу та конструкції. Одним з найбільш розповсюджених матеріалів, які застосовують для виготовлення радіаторів, є алюміній та його сплави. Конструктивно радіатори розділяють на пластинчаті, реброві та штирькові. Пластинчаті радіатори доцільно використовувати для розсіяння невеликих потужностей. Основна перевага пластинчатих радіаторів - простота виготовлення. Реброві радіатори значно ефективніші за пластинчаті і в сучасний час отримали велике розповсюдження. Найбільш ефективним є штирьковий радіатор, однак, завдяки більш складній технології виготовлення, радіатори цього типу знайшли менше застосування, ніж реброві.

Розміри радіатора залежать від потужності, яка розсіюється на транзисторі. Чим більша потужність, тим більший об'єм, маса як радіатора, так і стабілізатора у цілому. Зниження потужності, яка розсіюється на регулюючому транзисторі, дозволяє зменшити розміри радіатора, а отже, габарити та масу стабілізатора. Одним з способів зменшення потужності у послідовних стабілізаторах є шунтування регулюючого транзистора резистором. У цьому випадку частина струму навантаження буде протікати через резистор, струм колектора регулюючого транзистора зменшується, що зводить до падіння потужності розсіяння. У паралельних стабілізаторах послідовно з регулюючим транзистором вмикається резистор, що також призводить до зниження потужності, яка на ньому розсіюється.

Список літератури

1. Воробйова О.М. Основи схемотехніки: підручник / О.М. Воробйова, В.Д. Іванченко. – [2-ге вид.]. – Одеса: Фенікс, 2009.
2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. -К.: Каравела, 2009.-416 с.
3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. / За ред. А.Г. Соскова. – К.:Каравела, 2003. – 368 с.
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. – К.: Вища школа, 1987. – 422 с.
5. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.

Навчально-методичне видання

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Методичні вказівки до практичних занять

для здобувачів першого (бакалаврського рівня) вищої освіти
за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка».

Укладачі: Луценко Вадим Юрійович, Волчков Максим Володимирович

Комп'ютерне верстання *Р.В. Шушпанової*

Підписано до друку 22.01.2024 Формат 60 × 84 ^{1/16}

Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.

Електронний документ. Вид № 59/III-17.

Видавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи
ДК № 808 від 13.02.2002 р.